

MODELIZACION Y SIMULACION DE UNA PARED RADIANTE HIDRONICA SOLAR

F. Mendoza, L. Cardón*

*Laboratorio de Ciencia Computacionales, *INENCO

Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
e-mail: cardonluis2008@gmail.com

RESUMEN: Se desarrollaron dos modelos computacionales de una pared radiante hidrónica solar, contruidos a los efectos de extender las conclusiones obtenidas de la observación experimental. El primero de ellos es un modelo de parámetros concentrados construido con SIMUSOL, mientras que el segundo es un modelo de parámetros distribuidos, unidimensional, realizado con volúmenes de control. La simulación de la pared, construida con ladrillos huecos y con tubos calefactores de empotrados en su cara exterior y estudiada experimentalmente por Franco y Cardon (2011), reproduce adecuadamente los resultados experimentales. Los modelos desarrollados, basados en la ecuación de calor unidimensional, se usaron para estudiar el efecto térmico del uso de un material masivo (ladrillo común) en la construcción de la pared y de la colocación de los tubos calefactores del lado interno de la misma.

INTRODUCCION.

La “pared radiante hidrónica solar”, introducida por Cardon, es una pared de mampostería común (ladrillo o ladrillo hueco, argamasa y revoque) en la que se ha embutido un serpentín de tubería de polímero u otro material para transportar agua caliente proveniente de una caldera, en nuestro caso uno o más colectores solares. Por conveniencia energética (mayor resistencia térmica del lado de las pérdidas) los tubos se empotran del lado interior de la pared a los efectos de calentar su superficie y transmitir calor al interior de la habitación por radiación y convección. La pared, en una medida que debe cuantificarse, dependiendo de la capacidad calorífica del material de construcción, sirve de acumulador de calor. Para disminuir las pérdidas la pared se aíslada exteriormente. Franco y Cardon (2011) construyeron y estudiaron experimentalmente una pared hidrónica solar construida sobre una pared de ladrillo hueco existente y que, por requerimiento del comitente (prohibió la rotura del interior de la edificación) se realizó con los tubos del lado externo de la pared. La Figura 1 muestra una vista de frente de la pared en una de las etapas de construcción y un esquema de la misma. La Figura 2 muestra un esquema de la sección transversal de la pared. Bajo la suposición de que la pared calefactora pierde calor hacia el exterior o transfiere calor al interior en forma uniforme en toda su extensión, se plantea un modelo unidimensional basado en la ecuación de la energía.



Figura 1: Vista de frente y esquema con dimensiones de la pared calefactora.

En Figura 2 además se describen los materiales que la constituyen indicando el espesor de cada material. También se observa la incorporación de la envoltura adiabática en la cara superior e inferior de la pared. También se agregan envolturas adiabáticas en los costados que no se muestran. Esta envoltura restringe al flujo de calor a una sola dirección.

Se implementaron computacionalmente dos modelos para la misma pared, uno de parámetros concentrados (Jacoby y Kowalik, 1980) y otro de parámetros distribuidos. El primero, de parámetros concentrados, se construye utilizando la analogía que establece una correspondencia entre las variables térmicas y las variables eléctricas. En este modelo eléctrico se toma como hipótesis que el flujo de energía es unidimensional. Una vez construido el modelo, se simula empleando SIMUSOL. El segundo modelo consiste en una discretización de la ecuación de conducción de calor mediante el método de

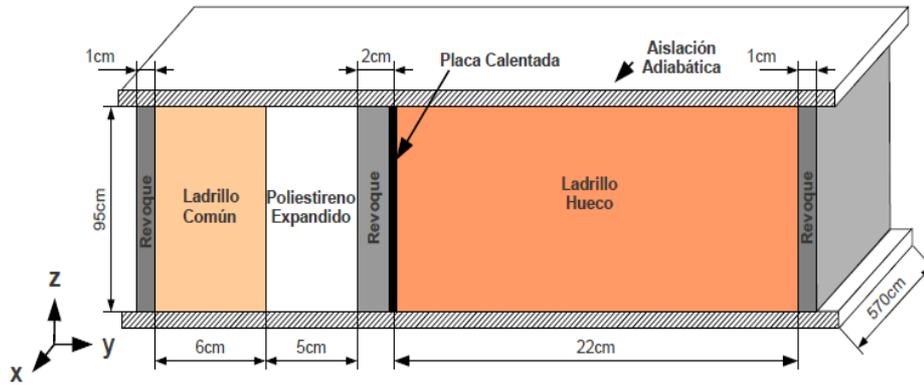


Figura 2. Esquema del modelo unidimensional de pared simulado.

los volúmenes de control, en el cual también suponemos flujo de energía unidimensional. El modelo requiere el conocimiento de los parámetros geométricos y físicos del prototipo.

MODELO DE PARAMETROS CONCENTRADOS

Un modelo de parámetros concentrados, se caracteriza porque las partes del sistema que se estudia se representan por un único valor. Por ejemplo, para caracterizar la temperatura del aire en una habitación, se supone que el fluido está totalmente mezclado y se toma un único valor representativo.

Utilizando la analogía entre las variables térmicas y las eléctricas (Incropera y DeWitt, 1999), se obtiene el equivalente eléctrico de cada fenómeno térmico. Las regiones de igual temperatura se representan mediante nodos. Estos nodos son indicadores del valor del potencial (análogo a la temperatura) en el circuito y están conectados a las resistencias térmicas y capacitores.

Para implementarlo computacionalmente se utilizó el programa *SIMUSOL* (<http://www.simusol.org.ar>) desarrollado por Saravia y Alía (2003).

Para modelar la pared se adoptan las siguientes suposiciones: flujo unidimensional del calor. Se considera una pared de superficie infinita, el aporte de energía se hace por medio de una placa calefactora (no interviene el material de la placa), que simula el efecto de los tubos, cuya potencia está determinada por los resultados experimentales. La placa, a diferencia de los tubos, permite considerar un flujo de calor unidimensional. Se sitúa entre el revoco original, externo de la pared, de 2 cm y el ladrillo hueco de la misma, en el mismo lugar donde se encontrarían los serpentines calefactores, según el esquema de la Figura 2.

Además, por simplicidad, se despreció la resistencia conductiva del material de los revocos de la pared, que fue incorporada junto con la del ladrillo hueco. Se considera únicamente su masa y calor específico. Se supuso adicionalmente que la pared solo intercambia calor con el aire ambiente. Se desprecia la radiación térmica hacia el suelo y cielo.

El modelo térmico de *SIMUSOL* con su tabla de configuración se presenta en la Figura 3.

El modelo utiliza como datos de entrada los valores de temperaturas, medidas correspondientes a los nodos: T_{ae} , temperatura ambiental del exterior, T_{ai} , temperatura ambiental interior del dormitorio, como así también los valores del flujo de energía proveniente del piso radiante, Q_p , que se determinaron experimentalmente. Estos valores imponen al modelo condiciones de borde iguales a las del sistema real y permiten prescindir de la modelización del resto de la vivienda.

En la construcción del modelo se utilizará al nodo T_{pe} para indicar la temperatura superficial exterior de la pared; T_{pi} para la temperatura superficial interior de la pared; T_{pa} para la temperatura de la interface pared aislante; y T_c para la temperatura de la zona aledaña a los serpentines. Además se agregan los nodos TL , TLA , TP estos nodos representan la temperatura en medio de los ladrillos (TL y TP), y de la interface ladrillo aislante respectivamente (TLA). Si bien estos nodos no resultan de la medición en la experiencia se los utilizan aquí para que el comportamiento del modelo se asemeje más al real.

Todos estos nodos se conectan unos con otros por medio de las resistencias térmicas. En los sólidos se usan resistencias conductivas. Estas resistencias se deben a (ladrillos, aislantes, revoco, etc.), para la región fuera de la pared intervienen las

resistencias convectivas y radiativas. En esta zona la pared interactúa con la atmósfera o ambiente. El aporte de energía hacia este sistema se realiza por medio de una fuente de calor Q_p conectada al nodo T_c . La fuente Q_p entrega energía según valores previamente generados a partir de datos experimentales

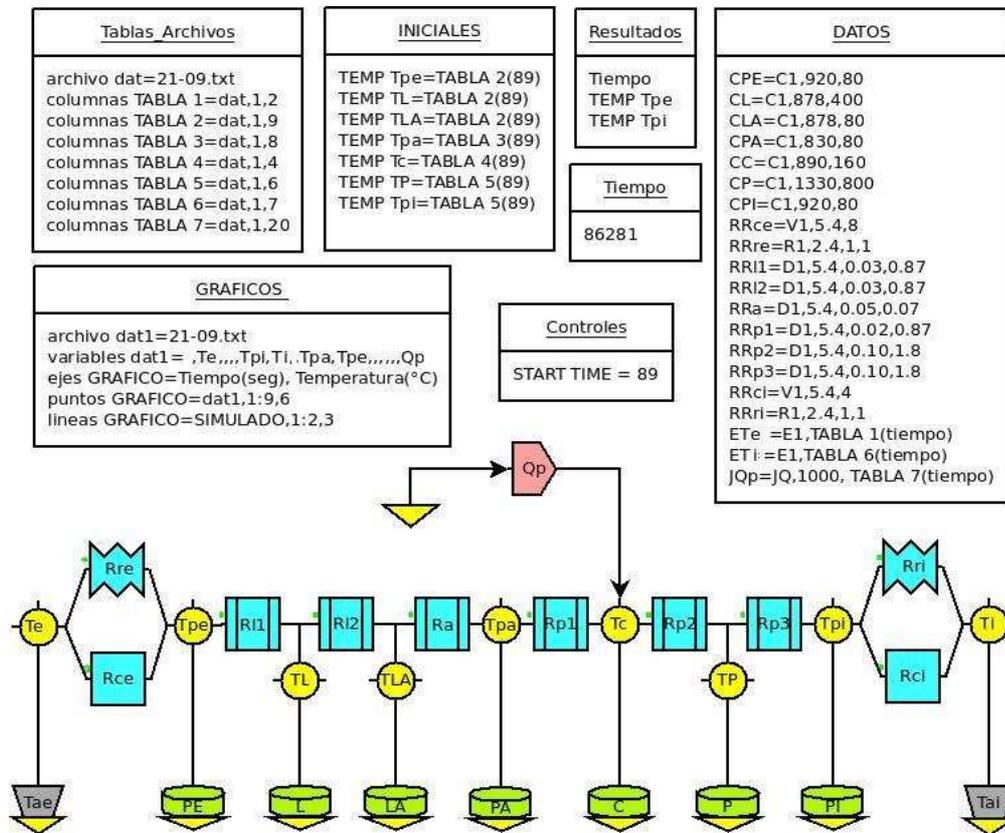


Figura 3: Modelo térmico del sistema Pared con su tabla de configuración en SIMUSOL.

Las propiedades térmicas y constructivas, los valores usados en la simulación, están definidos en la Tabla 1. En ella se definen espesor, conductividad térmica, capacidad calorífica, y masa de los materiales involucrados.

Conductividad térmica ladrillo hueco= $1.8 \text{ W/}^\circ\text{C.m}$	Calor específico ladrillo hueco= $1330 \text{ J/}^\circ\text{C.Kg}$
Conductividad térmica Poliestireno expandido= $0.07 \text{ W/}^\circ\text{C.m}$	Calor específico revoque pared= $890 \text{ J/}^\circ\text{C.Kg}$
Coficiente convectivo aire interior recinto= $8 \text{ W/}^\circ\text{C.m}^2$	Masa de pared de Ladrillo común= 560 Kg
Coficiente convectivo aire exterior recinto= $4 \text{ W/}^\circ\text{C.m}^2$	Masa de pared de ladrillo hueco= 1120 Kg
Emisividad superficie interna de la pared =0.9	Área de Pared considerada= 5.4 m^2
Emisividad superficie externa de la pared=0.9	Espesor pared ladrillo común= 6 cm
Factor de vista superficie interna de la pared =0.56	Espesor pared ladrillo hueco= 22 cm
Factor de vista superficie externa de la pared =0.56	Espesor de polietileno expandido= 5 cm
Calor específico ladrillo común = $878 \text{ J/}^\circ\text{C.Kg}$	Conductividad térmica ladrillo común= $0.87 \text{ W/}^\circ\text{C.m}$

Tabla 1: Valores de los parámetros térmicos y físicos.

Los resultados de la simulación para a las condiciones ambientales del día 21 se setiembre se muestran en la Figura 4 y para el día 9 de setiembre en la Figura 5.

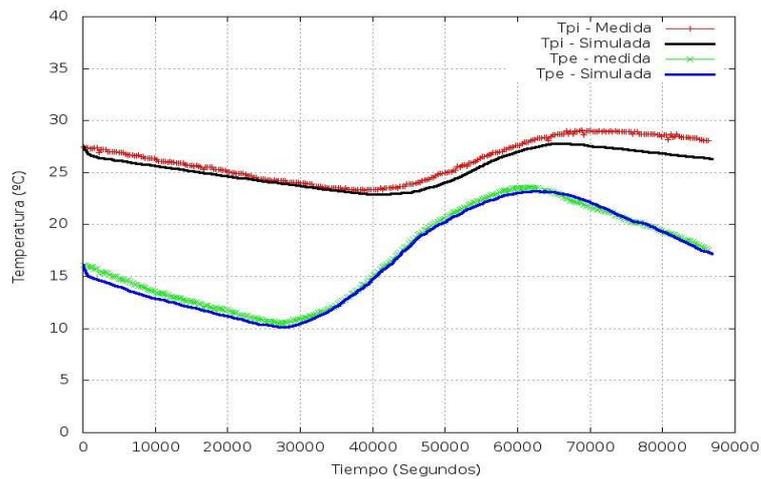


Figura 4: Temperaturas de los nodos Tpe y Tpi en función del tiempo – línea de puntos datos medidos, línea continua datos de la simulación para el 21 de Setiembre de 2008.

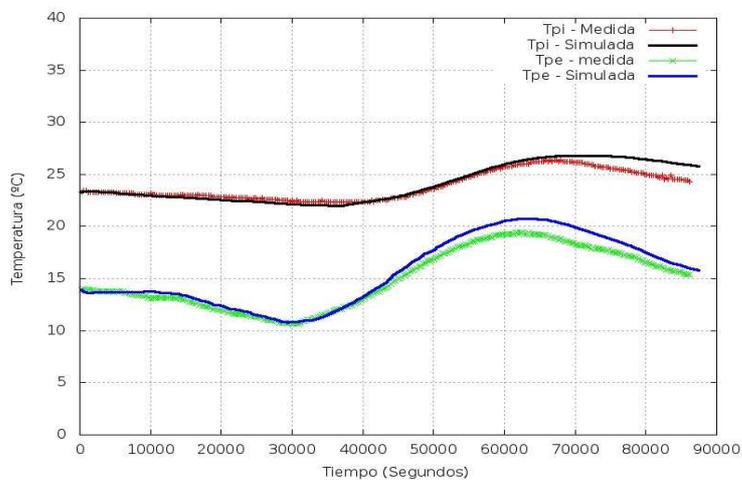


Figura 5: Temperaturas de los nodos Tpe y Tpi en función del tiempo para el 9 de Agosto de 2008. Línea de puntos temperatura experimental, línea continua temperatura simulada.

Las temperaturas simuladas, etiquetadas, *Tpe-Simulada* y *Tpi-Simulada* se muestra por línea llena mientras que las medidas, *Tpe-Medido* y *Tpi-Medido*, se grafican con línea de puntos. No se evidencia una gran diferencia entre simulación y medida, que no supera los 2°C (Figura 5). Se estima que el error de medición es de aproximadamente 0.5°C.

El modelo de parámetros concentrados presentado aquí aproxima bien el comportamiento de la pared radiante, con un error de aproximadamente 1°C como máximo (7%).

MODELO DE PARAMETROS DISTRIBUIDOS

En esta sección describiremos la formulación de un modelo de la pared basado en la discretización de la ecuación de conducción de calor. Se emplea el método de volúmenes de control (Patankar, 1980). El dominio de cálculo, la pared radiante en este caso, se divide en un conjunto de subdominios llamados volúmenes de control. Estos volúmenes no se superponen entre si y abarcan al dominio de cálculo en su totalidad.

Se simuló la pared durante una secuencia de días tipo, hasta que la pared alcanza el estado permanente (periódico). El problema no tiene estado estacionario. Se simularon dos casos. En el primero con el sistema es solar activado todos los días de la simulación. En el segundo, luego de alcanzado el estado permanente bajo el modo de calefacción, se suprimió el aporte solar, situación que ocurre cuando luego de varios días claros se tiene una secuencia de días nublados.

Dado que el problema es transitorio por naturaleza, requiere de condiciones iniciales que no se disponen (al menos no para la mayoría de los nodos). Para generar condiciones iniciales adecuadas, se simula primero varios días sometidos a las condiciones de borde del día señalado, partiendo de condiciones iniciales arbitrarias, luego, el estado así obtenido se utiliza

como condición inicial para el último día de la simulación. Se utilizaron ocho días de simulación para generar las condiciones iniciales. Aparentemente cuatro son suficientes.

Las Figuras 6 y 7, muestran los resultado de la simulación y los experimentales para la temperatura superficial exterior e interior respectivamente.

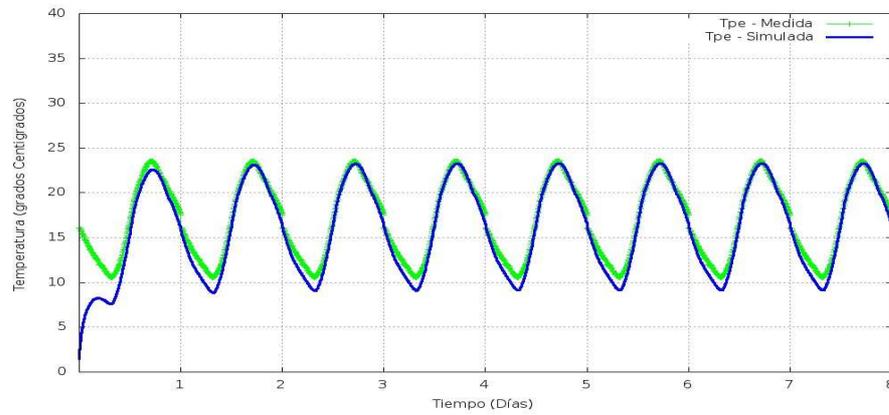


Figura 6: Evolución de Tpe. Línea Azul: simulada, línea de puntos verde: medida.

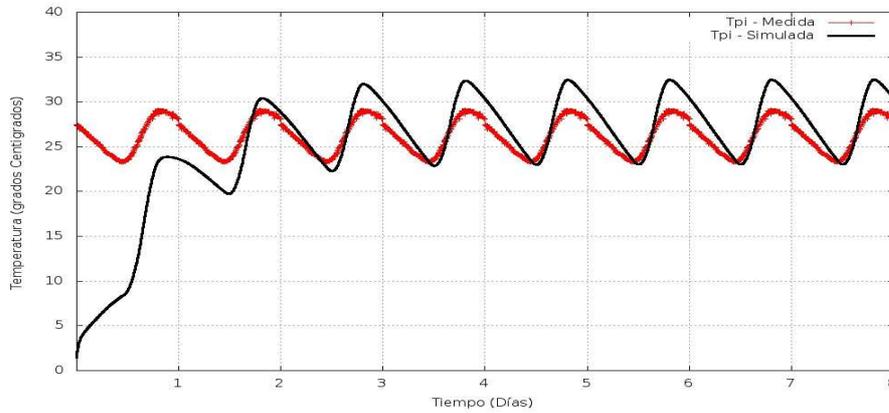


Figura 7: Evolución de Tpi. Línea Azul: simulada, línea de puntos verde: medida.

Las temperaturas superficiales de la pared exterior (Tpe) se acercan a los datos medidos con una diferencia del 6%. Para la temperatura interior de la pared, Tpi , (Figura 8) la diferencia porcentual es 15%.

Una vez validado el modelo, se uso para simular el comportamiento de la pared en caso de una secuencia de días nublados luego de varios días claros. Para ello, luego de alcanzado el estado permanente descrito precedentemente, se suprimió la fuente de calor y se continuó con la simulación. Las Figuras 8 y 9 muestran los resultados.

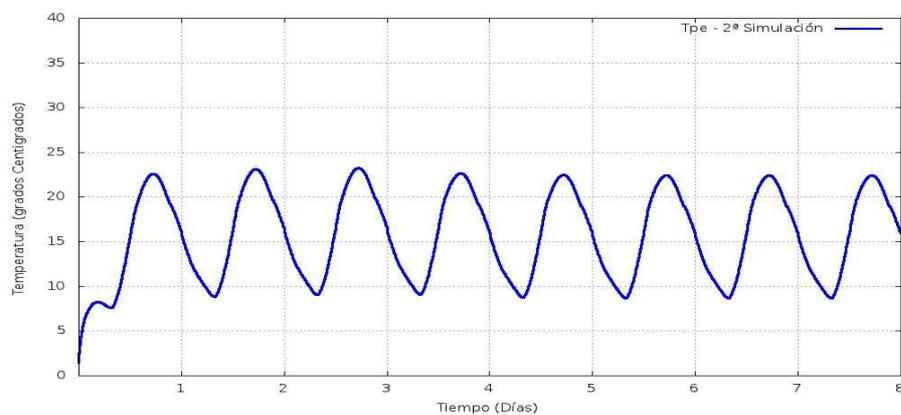


Figura 8: Evolución de Tpe en la segunda simulación (Línea Azul).

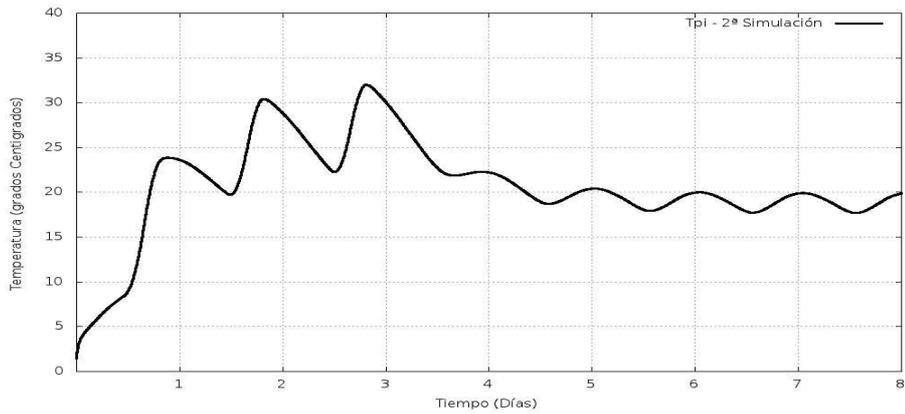


Figura 9: Evolución de T_{pi} en la segunda simulación (Línea negra).

Se observa que después del cuarto día, y suprimida la calefacción, las temperaturas interior media diaria disminuye como así también la amplitud de su oscilación.

La temperatura de la pared exterior, fuertemente acoplada con la temperatura ambiente, no se ve afectada al apagar al sistema. Solo desciende 1°C , en promedio manteniéndose la amplitud de variación. En el caso de la temperatura de la superficie interior de la pared (T_{pi}) desciende 8°C en promedio. A diferencia del primer caso de simulación presenta una oscilación amortiguada entre los 18°C a 20°C . Se reduce la oscilación en un 80%.

OTROS CASOS

Se estudió la influencia del material en la evolución de las temperaturas. Las Figuras 10 y 11 muestran la temperatura de la pared interior y exterior para el caso de ladrillo común y ladrillo hueco.

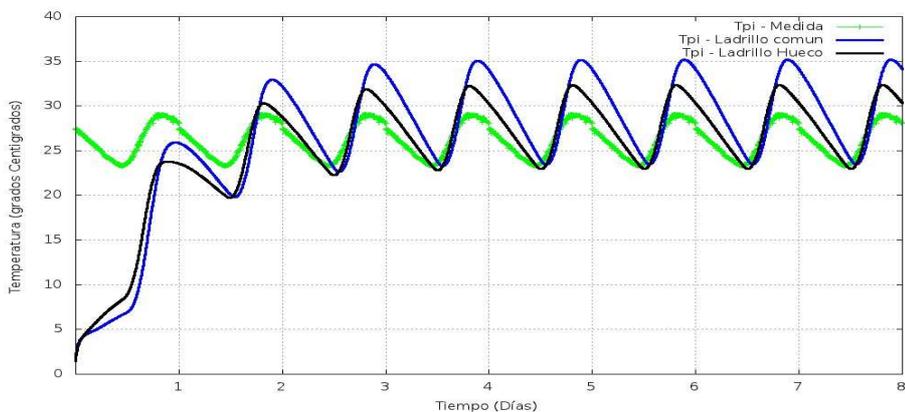


Figura 10: Evolución de la temperatura superficial interior a la pared, con aporte de calor del lado exterior.

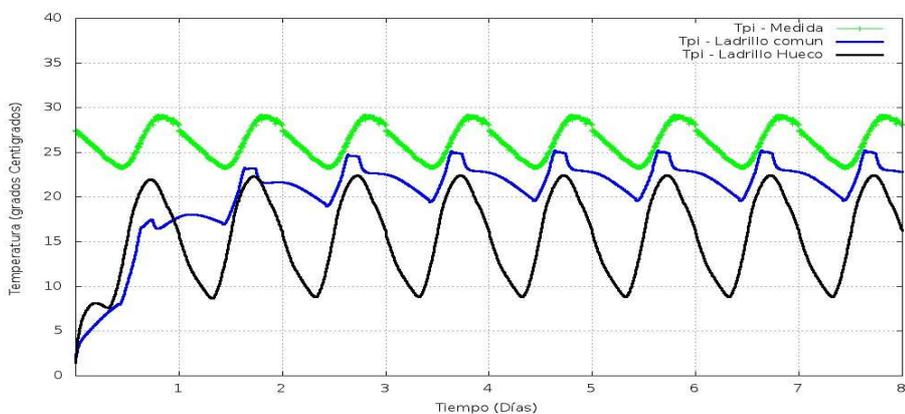


Figura 11: Evolución de la temperatura superficial interior a la pared, con aporte de calor del lado interior.

Se estudio también la influencia de la ubicación de la fuente de calor (los serpentines calefactores). Las Figuras 10 y 11 muestran la variación de temperatura, para ambos materiales, ladrillo común y ladrillo hueco respectivamente.

Las Figuras 12 y 13 muestran los resultados obtenidos para la pared del lado exterior, para los casos antes descritos.

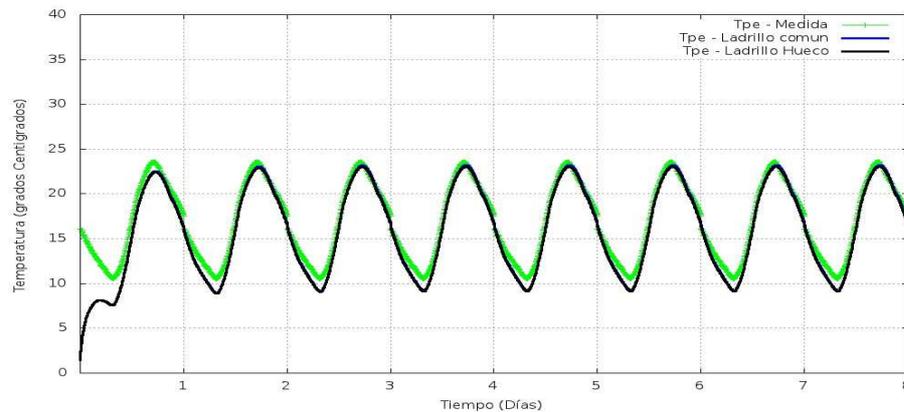


Figura 12: Evolución de la temperatura superficial exterior a la pared, con aporte de calor del lado exterior.

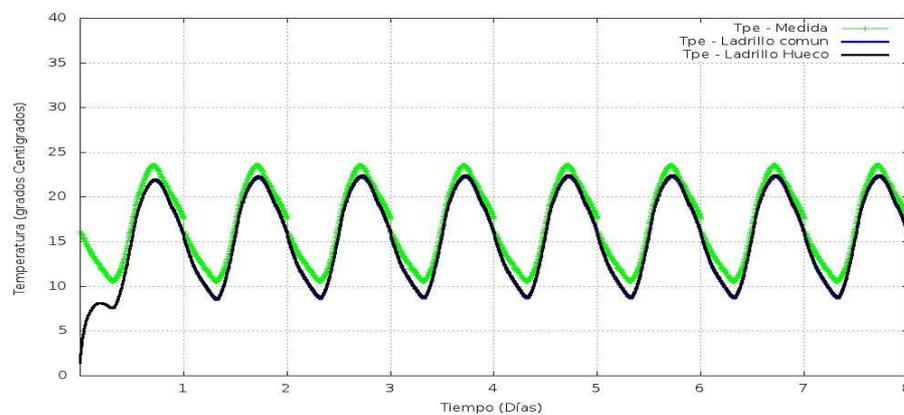


Figura 13: Evolución de la temperatura superficial exterior a la pared, con aporte de calor del lado interior.

CONCLUSION

En el modelo de parámetros concentrados se observó que las temperaturas simuladas y las medidas difieren en 1°C aproximadamente. La diferencia máxima encontrada es del 7%. En el modelo de parámetros distribuidos, se requieren cuatro días de simulación para generar una condición inicial adecuada, luego la diferencia entre las temperaturas simuladas y medidas es de cerca del 15%. Las temperaturas de la pared estudiadas, tanto interior como exterior, son altamente dependientes de la temperatura del aire a través del coeficiente convectivo que es difícil de estimar. Los resultados mostrados no son por lo tanto conclusivos y se está trabajando en una mejor estimación de estos parámetros para que estas simulaciones sean de mayor utilidad. Esperamos mostrar estos resultados durante la reunión.

REFERENCIAS

- Mendoza, F., y Cardon, L. (2011) Construcción y ensayo de una pared radiante hidrónica Solar. Aceptado para publicar en AVERMA.
- Cardon, L., y Alberto, D. (2007). Efecto de la aislación inferior y lateral de un piso radiante. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 8205 - 8212.
- Hernández, A., y Cardon, L. (2007). Evaluación térmico energética de un piso radiante hidrónico acoplado a colectores solares para calentamiento de agua. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 51 - 59.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de la transferencia de calor* (Vol. 4a ed). México: Prentice Hall.
- Jacoby, S. L., & Kowalik, J. S. (1980). *Matemática Modeling With Computers*. New Jersey: Prentice Hall.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor and Francis.

Saravia, L y Alía D. (2003). *Simusol: un simulador numérico de sistemas solares*. Energías Renovables y Medio Ambiente, 45-52.

ABSTRACT

Two computer models of a solar hydronic radiant wall were developed. They were built for the purpose of drawing further the conclusions, beyond experimental observation on a radiant wall. The first is a lumped parameter model based on SIMUSOL. The second is a one dimensional distributed parameter model, made with the control volume discretization method, based on one-dimensional heat equation. The wall, built with hollow bricks and with heating pipes embedded in its outer face was studied experimentally by Franco and Cardon (2011), and its simulation, presented here, reproduces well the experimental results. Modification of the model were used to study the effect of using massive material (common, instead o hollow brick) in thermal behavior of the wall, and the placement of the heating pipes on its interior side.

Keyword: hydronic solar radiant wall